

“第四国土”资源

——探索雄安新区地下空间资源开发与利用

□ 文图 / 韩 博 郭 旭 张 曦 杜亚楠 马 震 刘宏伟



＞水利万物

第一作者简介 韩博，高级工程师，长期从事水工环地质与国土空间地质调查研究工作。

我国的城镇化进程为城市发展带来了诸多好处，比如，加快经济发展，促进经济增长，提高就业率，形成城乡联动的发展格局；提升城镇质量，促进城市绿色发展，改善城市交通水平，提高居民生活环境；改善公共服务设施配套，

建立更完善的社会保障制度，提供更多公共服务，提高人民生活水平。但随着城镇化进程的快速发展，也带来了诸如环境污染、资源短缺、交通拥堵等“大城市病”问题，严重制约城市的健康发展，影响人民的幸福指数。为疏解北京非首都功能，中央决定设立河北雄安新区，解决“大城市病”问题，促进城市可持续健康发展。《河北雄安新区规划纲要》中明确要求“有序利用地下空间”“按照安全、高效、适度的原则，结合城市需求，积极利用浅层、次浅层空间，有条件利用次深层空间，弹性预留深层空间……”。在目前有限的城市地表空间前提下，城市地下空间的开发与利用成为未来城市可持续发展的必然趋势，而雄安新区生态之城的建设，更离不开地下空间的开发。

“第四国土”资源

开发利用地下空间是解决“大城市病”问题的重要途径，在未来城市发展中，城市地下空间将扮演重要角色，创造出巨大的社会财富及经济效益。因此，地下空间作为陆、海、空外的城市“第四国土”，是城市建设的新型国土资源和实现城市功能的重要载体和有益补充，更是实现可持续发展、追求城市高品质生活的重要保障。

雄安新区地下空间资源

顾名思义，地下空间资源就是地表以下的空间资源。根据已获取的雄安新区 70 米深度范围内地下空间资源的调查研究成果，将雄安新区 70 米深度范围内地下空间资源开发利用层位划分为三层，分别为浅层地下空间（0 ~ 30 米）、次深层地下空间（30 ~ 50 米）、深层地下空间（50 ~ 70 米）。对地下空间分层开发，首要考虑因素是含水砂层厚度。众所周知，雄安新区地面之下蕴含大量地下水资源，其主要赋存于地下砂层之中，分层分布。为了更安全地开发地下空间资源，同时也为了保护宝贵的地下水资源，地下空间开发应尽可能避开含水砂层，同时也应综合考虑地形地貌、地下水水位标高、地下水腐蚀性、地面沉降、活动断裂、砂土液化、地基土承载力等影响工程安全的因素，在此基础上建立雄安新区起步区地下空间资源开发利用适宜性评价模型。评价结果认为：在浅层地下空间资源中，土体结构均匀，可挖掘开发利用的黏性土占比高达 90%，可利用厚度 18 ~ 30 米，受地下水影响小，适宜规模化开发，适宜和较适宜开发的面积占新区总面积的 93.89%；次深层地下空间资源中，可利用厚度大于 12 米的面积超过 50%，平均深度范围 35 ~ 50 米，中部存在贯穿东西的次深层地下空间规模化开发的有利地带，影响开发主要因素为地面沉降，全区都适宜和较适宜开发；深层地下空间资源中，可利用厚度大于 12 米的面积超过 80%，适宜和较适宜开发的面积占新区总面积的 99.73%。总体上，雄安新区起步区地下空间资源较适宜—适宜开发。三层地下空间资源中，适宜开发的约占 43%，较适宜开发的约占 55%，不适宜开发的约占 2%。

地下空间资源开发利用方式

当前发达国家，如德国、日本、新加坡等，地下空间的开发利用逐渐形成了以轨道交通为主体，其他市政、文娱基础设施并行发展的地下空间开发模式，主要包括地下交通设施、地下综合体、地下综合管廊、地下停车场、地下商场以及地下人防工程等。雄安新区地下空间开发利用要体现对标国际、注重衔接、论证充分的特点，在道路交通、地下空间工程、城市防洪防涝等专业领域亦是要打造成为国内外未来城市发展的样板。

地下轨道交通

地下轨道交通是当前我国大城市开发利用地下空间资源的主要方式。1965 年，我国建成了最早的地下轨道交通——北京地铁。目前上海地铁成为世界上现今规模最大、线路最长的地铁系统。截至 2020 年，北京、上海、广州、深圳、南京、重庆、武汉、成都等大城市都已经建成或正在建设比较完善的轨道交通网络，有效缓解了地面交通拥堵问题。

最近，已建成的雄安新区容东片区 E3 穿湖隧道工程吸引了人们目光，隧道内为双向 4 车道干线公路，宽度超过 20 米，高度达 7 米多，加上隧道上方是容东片区的核心公园——金湖公园，行驶在隧道内，会给人带来一种穿越时空的快感。隧道安全系数高，底板、顶板和侧墙厚度均接近一米。隧道内排水系统也是最优配置，可以确保隧道安全。京津冀协同发展专家咨询委员会组长、中国工程院主席团名誉主席徐匡迪表示，雄安新区要建设 21 世纪综合地下空间工程，将城市交通、水电气、城市防灾体系等置于地下，把地面让给绿化和行人。容东片区 E3 穿湖隧道公路，是雄安新区第一条隧道公路，也将是新区内最重要、最壮观、最值得游览的一条隧道公路。

此外，随着雄安新区“四纵两横”区域高速铁路交通网络的加速建设，起步区东西轴线雄安新区 R1 线、雄忻高铁、雄商高铁等地下段工程均在热火朝天建设中，以雄忻铁路、雄安至北京大兴机场快线地下段项目为引领，逐渐形成了雄安的景观廊道、交通廊道和功能廊道，这将是一个“涉及铁路、市政、水利、园林等多领域、多学科、多专业的系统工程”。

地下公共服务设施

随着地下轨道交通的快速发展，地下公共服务设施在城市地下空间开发利用中得到了迅速提升。目前，我国已建成面积超过 1 万平方米的地下商业综合体有 200 个以上，超过 2 万平方米的也有近百个。其中，上海虹桥地下商业服务区是目前国内最大的地下商业综合体，地下空间开发面积达到 260 万平方米；北京王府井地下商业综合体以地下街的形式，将地铁交通、地下商场、地下车库等公共服务设施有效组合，并配套步道系统、下沉式花园等形式，构建了王府井立体化地下综合商业系统。我国城市各种各样的地下公共服务设施也在积极建设之中，如地下博物馆、地下医院、地下实验室、地下文娱中心、地下仓库，等等。陕西汉阳陵博物馆充分融合现代科学

技术就地开发保护，直观地呈现出波澜壮阔的地下王国。

现阶段，雄安新区正处于基础设施大规模建设阶段，未来雄安新区将根据总体规划，建设科学、合理、生态的地下公共服务设施体系。

地下综合管廊

雄安新区地下综合管廊是何种景象？综合管廊是一个城市市政基础设施的生命线工程，地下综合管廊是雄安新区城市建设中很有特色的部分。作为未来之城，雄安新区在推广应用综合管廊新技术、以设计引领高品质建造等方面，起到了示范带头作用。雄安新区地下综合管廊建设被形象称为未来之城的“大动脉”和地下“生命线”。按照先地下、后地上的理念，雄安新区规划建设约 300 千米的“干线一支线”两级综合管廊。2020 年 10 月份，雄安新区容东片区地下综合管廊干线已全线贯通。目前，雄安新区已建成地下综合管廊 136 千米、已投运 47.6 千米，最大开挖深度 22.5 米，相当于 7 层住宅楼的高度，采用三层四舱结构。最上面是物流通道层，用于无人驾驶车，以及物流货运系统通行，运输通道宽度 14.4 米，高度 7.8 米，最宽处可容纳 6 台大货车并排行驶，相当于双向四车道；中间层是用于人员疏散和通风设备安装的夹

层；最下面则是四个不同功能的管线舱，满足未来城市能源、电力、通信、供水的传输需求。整个地下综合管廊都装有智能监控中心，包括监控、智能烟感等设备都会与 5G 挂钩。未来 5G 技术将被充分运用，例如，通过车辆无人驾驶技术，编好程序，车辆在地下可以通过 5G 信号，自动在停靠点卸货、装货，能有效缓解地面交通压力，提高城市运输效率。相较于传统管廊各舱室独立设置，附属设施无法共享等问题，雄安新区综合管廊在设计和施工中借鉴国外先进经验，提出创新共舱理念，实现管线集约、运维共享。

未来的雄安，街头不见井盖、抬头没有电线。水、电、气、暖、网等市政配套基础设施管线全部集纳在地下综合管廊中。雄安新区综合管廊建设将努力打造一个经济实用、可复制、具有创新示范作用的综合管廊体系，成为雄安新区这座未来智慧城市体系的重要组成和骨干载体。一座地上、地下联动，立体高效的 3D 城市运输系统将呈现在世人面前。

地下人防工程

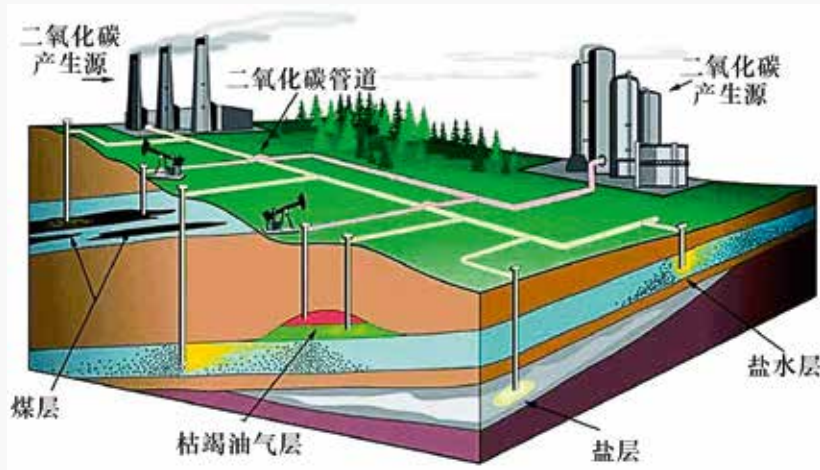
新中国早期的人防工程建设缺乏整体规划与设计，整体布局与城市发展相脱节，造成了诸多地下空间的浪费问题。进入 21 世纪后，随着城市地下空间开发的需求日益增加，地下空间统筹规划、协调发展的思路逐渐深入人心，逐渐将城市交通枢纽、重要基础设施与地下停车场、地下商场等立体化设计，开展专项的抗武器毁伤、战争避难生存概率评估分析，从真正意义上开始体现出人防工程二元化作用。雄安新区在地下空间开发利用过程中，可将人防功能融入到地下综合体中，逐渐形成具有人防工程功能的大型多元化地下综合体，可实现人防工程战时的避难、疏散、救援等功能。

特殊地下空间资源开发利用方式

除了上面描述的地铁、地下商场和停车场、地下综合管廊等地下空间利用方式外，还有一些特殊性质的地下空间资源（如煤层、枯竭油气层、地下



＞ 雄安高铁站 视觉中国 / 供



二氧化碳地质封存

含水层和密封性好的地下洞穴），其在大规模物质储存、能源储备等方面具有得天独厚的优势，正在石油和天然气战略储备，以及电网发电峰谷调节等领域发挥着重要作用。雄安新区作为典型的冲洪积、冲湖积华北平原城市，有比较充足的地下含水层、油气层、地热层等资源，除了常规地下空间开发利用方式外，还可利用已经枯竭的油气层、深部含水层、深部地热储层等特殊地下空间资源进行地下储气、二氧化碳地质封存、高压气体发电等特殊用途。

地下储气

天然气井每天都在源源不断地生产着天然气，但是人们使用天然气却有高峰和低谷。为了适应天然气用量的变化，在地面愈发拥挤的当今，人们可以利用特殊地下空间资源来

事故等紧急情况下保障供气。

二氧化碳地质封存

当人们使用煤、石油、天然气等化石能源时，必然会产生大量二氧化碳气体，为了不让这些二氧化碳进入空气，破坏生态环境，2060 年实现碳中和，雄安新区可将多余二氧化碳经由输送管线或车船运输至适当地点后，直接注入到旧油气田、深层地下水层、地热储层等特定地质条件及特定深度的地层中。

高压气体发电

特殊地下空间除了可以存放各种物质，还可以用来发电。当风力发电机遇到大风，准备大干一场时，却发现这会儿人们偏偏不需要这么多电，只能眼看着多

余的电能白白浪费，这时我们就需要一种方式，将多余的电能间接储存起来，于是特殊地下空间便派上用场了。雄安新区可利用这种方式发电，即利用多余的电能将高压气体注入地下储存起来，当其他发电方式发电量不足时，便打开一个口子，让高压气体吹动发电机，这样便产生了电能，可实现多余电能的有效循环利用。

未来城市地下空间资源开发利用发展构想

中国工程院院士谢和平提出了未来生态地下城市的构想，未来城市地下空间采用分层而建的形式，构建一个能够实现能量自平衡的相对独立的生态体系。可分为 5 个层级：地下轨道交通与（人防）避难

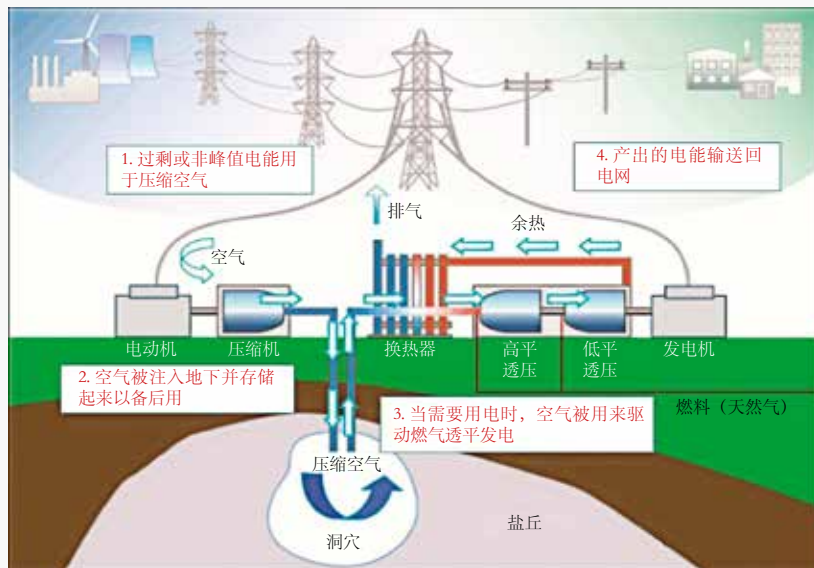
设施（0 ~ 50 米），主要包括地下交通设施、地下综合体、地下综合管廊、地下停车场、地下商场以及地下人防工程等；地下宜居城市（50 ~ 100 米），主要包括房地产、公园、医院、体育场和游乐场等，其形成独立的深地自循环生态系统；地下生态圈及战略资源储备（100 ~ 500 米），主要包括地下生态圈、垃圾处理厂和地下储备库等；地下能源循环系统（500 ~ 2 000 米），主要包括能源循环带和地下水蓄能等；深地科学实验室及深地能源开采（大于 2 000 米），主要包括深地科学探索、深地实验室和固态资源开发利用等。

作为行业专家的北京市政总院地下空间设计院院长杨京生，深度参与了雄安新区起步区、启动区地下空间，综合管廊工程的规划编制及评议工作。杨院长介绍未来雄安新区地下空间开发具有分层管控、打破壁垒、扩展基底三大特点，地下空间工程需要耦合各种情况，需要打破不同专业、行业的限制，加强各行业、各设施的联系。

雄安新区设立后，“两个雄安”就成为人们的一种期待。“地上雄安”自然是世界一流、万众瞩目，无论是交通、旅游，还是建筑、生态，都将是国际标准；“地下雄安”则别具一格，以地下交通、地下公共服务设施、地下综合管廊等为代表的地下工程，使得雄安拥有了另一番风采。

第一作者单位 / 中国地质调查局天津地质调查中心

（本文编辑：张佳楠）



高压气体发电



未来之城——雄安新区 视觉中国 / 供